

連続降雨による土壌水分状態の変化を考慮した洪水流出計算手法の提案

Proposal of Flood Runoff Calculation Method Considering Fluctuation of Soil Moisture Condition Due to Continuous Heavy Rain

室蘭工業大学 ○学生員 田中 雅人 (Masato Tanaka)
 室蘭工業大学 正 員 中津川 誠 (Makoto Nakatsugawa)
 室蘭工業大学 学生員 谷口 陽子 (Yoko Taniguchi)
 室蘭工業大学 学正員 宮崎 嵩之 (Takayuki Miyazaki)

1. はじめに

2016年8月17日から23日にかけて、7号、11号、9号の3つの台風が北海道に連続して上陸し、各地に洪水被害をもたらした。さらにその一週間後の8月30日には台風10号によりもたらされた降雨により、石狩川水系や十勝川水系では堤防の決壊や河川の氾濫が発生するなど甚大な被害となった。今回の洪水の特徴として、先行する3つの台風により土壌水分量が高い状態で維持されたことで、台風10号の降雨による流出を増大させた点が挙げられる。

現在現実化されている洪水流出計算モデルでは、モデルパラメータを過去の特定のケースに基づいて決定しているが、今回の洪水事例のように同一流域において流量のピークが複数発現する事例では再現性が低下する可能性がある。谷口ら¹⁾はこうした事例に対応するため、土壌水分状態の変化を考慮し、入力値として土壌中に貯留される水分量を用いるほか、流出率に関するパラメータを変動させることで、洪水時のピーク流量を現行モデルより安全側に算出できる流出モデルを提案した。しかしながらこのモデルにおいて、土壌の水分量は初期値として使用するのみであり、本事例のように大雨が複数発生し、土壌水分状態が随時変化する事例については対応できない可能性がある。

そこで本研究では土壌水分状態の毎時間ごとの変化を土壌浸透に係るパラメータと関係づけることで、連続降雨による流出量の増大を再現できるように、現行の流出計算モデルの改良を試みた。

2. 研究方法

2.1 災害事例と対象流域の概要

本研究は、2016年8月の台風による洪水被害を受けた空知川上流の金山ダム流域および札内川上流の札内川ダム流域を対象とした。8月28日からの降雨により、空知川流域の串内観測所では8月31日0:00に最大時間雨量49mm、その後同日10:00までに累積雨量515mmを記録した。また、南富良野町の幾寅地区では空知川の堤防決壊が国管理区間の2箇所が発生し、約130haが浸水した。札内川流域では札内川と戸蔭別川の合流地点で堤防が決壊し、約50haが浸水した²⁾³⁾。

各ダム流域において、同年8月1日1:00から9月15日0:00までの期間の積算雨量およびダム積算流入高の関係を図-2に示す。本災害では台風7号から9号までの降雨により、土壌中の湿潤状態が保たれたまま台風10

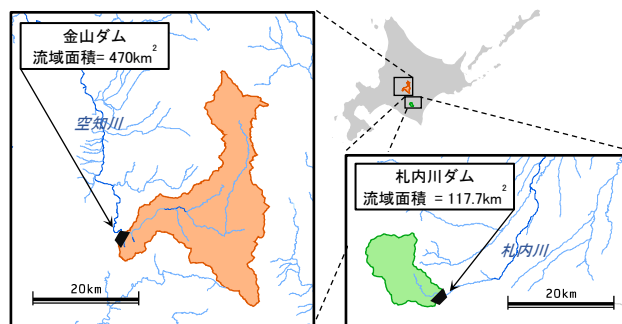


図-1 金山ダム・札内川ダム流域の概要図

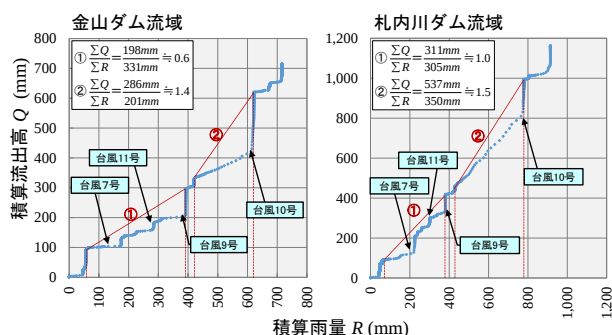


図-2 金山ダム・札内川ダム流域のR-Q曲線

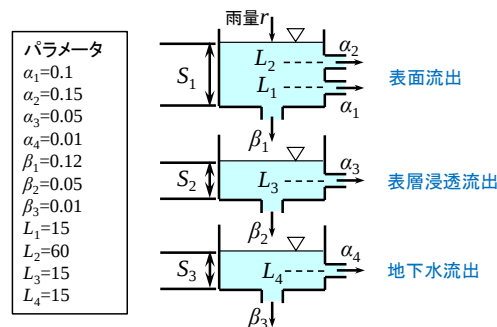


図-3 土壌雨量指数計算の模式図

号の降雨がもたらされたため、図中①に示す先行する3つの台風による流出に対して、②に示す台風10号による流出が降雨以上に発生したことがわかる。

2.2 土壌水分状態の定量化

土壌水分状態の評価手法として、気象庁が警報・注意報発令基準に採用している土壌雨量指数 (Soil Water Index, 以下SWI) を用いた⁴⁾⁵⁾。SWIは時間降雨量を図-3に示す直列3段タンクモデルの第1段タンクに入力し、3つのタンクの貯留高の合計値をSWIとして求めて

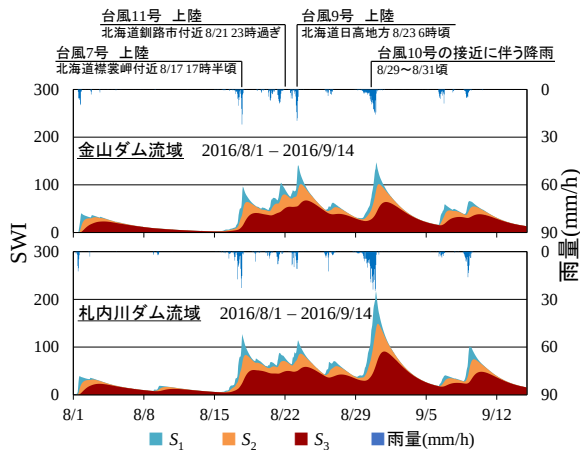


図-4 SWI 各タンク貯留高および流域平均雨量の推移

いる。ここで、第1タンクの側面流出孔からの流出は表面流出を、第2タンクからのものは表層浸透流出を、第3タンクからのものは地下水流出に対応している。また、タンク底面の流出孔からの流出は土壌中への浸透を表す。なお、SWI算出にあたり、タンクモデルのパラメータは現在気象庁で用いられている値を使用し、雨量データは1kmメッシュレーダー解析雨量を流域界内で切り出し、その平均値を用いた。この際、対象期間は先行降雨の影響を考慮し、2016年8月1日から9月14日までとした。各タンク貯留高の推移とレーダー解析雨量を流域ごとに平均した値、および台風上陸の日時を図-4に示す。図によると、台風7号、11号、9号の連続した降雨によってSWIが下がりきらず、台風10号の降雨でSWIが大きく上昇する結果が示されている。

2. 3 土壌水分状態を考慮した流出解析手法

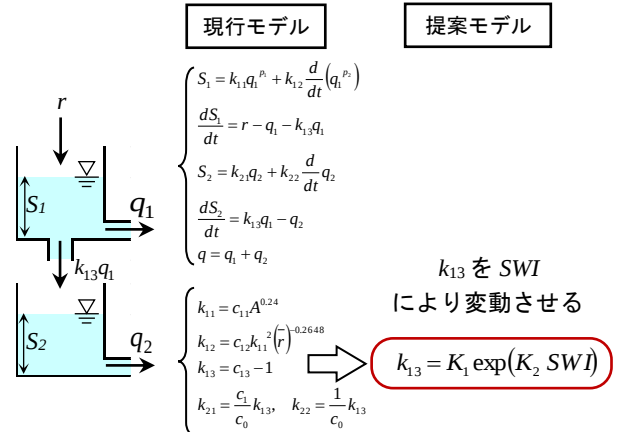
(1) 現行モデル

国土交通省北海道開発局の現業部門で用いられている洪水流出計算モデルは、星ら⁶⁾が提案した「一般化貯留関数モデル」「1段タンク型貯留関数モデル」および「2段タンク型貯留関数モデル」の3つである。以降これらを「現行モデル」と称し、図-5に例として2段タンクモデルの模式図と基礎式を示す。

現行モデルは流出過程の非線形性を比較的簡単な構造式で表すことができ、河川の洪水予測や洪水時のダム操作のための貯水池流入予測に用いられている。また、1段タンク型貯留関数モデルや2段タンク型貯留関数モデルは、観測雨量をそのまま使用できるという特徴があり、流出解析の前処理として必要とされていた基底流量の分離作業や流出率を決めるといった作業を必要としない。

しかしながら、現行モデルではパラメータの設定を事例ごとに行うことは難しく、また、特定ケースのみの降雨と流出の関係に基づいて固定されたパラメータを用いるため、連続して発生し、ピークを複数もつような降雨についてはピーク流量の再現性が低下することが予想される。このような降雨による流出を再現するには、先行降雨の影響による土壌水分状態の変化を流出計算に反映し、土壌への浸透に関するパラメータを変化させるモデルが必要と考える。

2 段タンク型貯留関数モデル



S_1 : 第1タンク貯留量(mm/h), S_2 : 第2タンク貯留量(mm/h), q_1 : 表面流出高(mm/h), q_2 : 中間・地下水流出高(mm/h), r : 観測雨量(mm/h), $\bar{r}$: 平均有効雨量強度(mm/h), A : 流域面積(km²), k_{11} , k_{12} , p_1 , p_2 : モデルパラメータ, c_{11} , c_{12} , c_{13} : モデル定数, c_0 , c_1 : 定数, K_1 , K_2 : 回帰係数, SWI : 土壌雨量指数

図-5 現行モデルと提案モデルの相違

(2) 土壌水分量を考慮した流出モデル

Horton⁷⁾は降雨による土壌への浸透量が降雨継続時間とともに減少し、残りは地表流となる関係を提案している。また現行の2段タンク型貯留関数モデルでは土壌中への浸透量に寄与するパラメータが k_{13} として与えられており、 k_{13} の大小が流出量の増減を表現している。これらに基づき、本研究では k_{13} に影響する変数を SWI として与える。ここで、 SWI は既往洪水事例における流量ピーク時の値を代表値として用い、これと現行モデルで観測流量を再現しようよう決定したパラメータ k_{13} との相関を求め、土壌水分状態の変化に応じて流出量を決定するよう、次の近似式で定式化した。

$$k_{13} = K_1 \exp(K_2 SWI) \quad (1)$$

ここで、 k_{13} : 浸透係数, K_1 , K_2 : 回帰係数, SWI : 土壌雨量指数である。ここでは現業レベルでの汎用性を鑑み、導入実績のある2段タンク型貯留関数モデルに式(1)を組み込むことで SWI を考慮したモデルを提案する。図-5にその概要を示す。

(3) 現行モデルによる既往洪水再現

今回の検討では、既往洪水事例として2002年から2015年までの金山ダム流域および札内川ダム流域において洪水ピーク流量が上位6位以内となる洪水、および、2016年の台風9号、10号の洪水について現行モデルを用いた流出解析を行い、実績流量を再現しようパラメータを設定した。再現を行う流量として、各ダムの流入量データをその流域に降った降雨による流出として用いた。パラメータは次式で与えられる平均二乗誤差の平方根(以下、RMSE)が最小となる値を事例ごとに試行錯誤によって探索することで最適化を行った。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (q_{oi} - q_{ci})^2} \quad (2)$$

ここで、 q_{oi} は降雨開始 i 時間後の観測流出量(m³/s), q_{ci}

表-1 現行モデルによる最適化パラメータ

金山ダム流域 洪水事例		ピーク比流量 (m ³ /s/km ²)	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	T _c	NS係数	Jpe	k ₁₃	SWI
台風10号	2016年8月	3.31	4.000	0.844	1.600	28.0	0.96	0.13	0.60	149
台風9号	2016年8月	1.02	9.000	0.215	1.800	76.0	0.96	0.05	0.80	125
既往2位	2006年8月	0.81	4.700	3.402	3.100	92.0	0.85	0.21	2.10	99
既往3位	2003年8月	0.62	10.100	0.210	4.075	50.0	0.98	0.00	3.08	113
既往4位	2005年8月	0.50	7.400	0.160	4.350	32.0	0.96	0.04	3.35	93
既往5位	2012年9月	0.47	4.700	2.803	5.375	110.0	0.79	0.34	4.38	86
既往6位	2010年8月	0.41	5.600	3.402	6.025	56.0	0.80	0.29	5.03	86
既往7位	2011年9月	0.36	3.300	5.401	9.001	22.8	0.76	0.19	8.00	85
平均			6.100	2.054	4.416	58.4				

札内川ダム流域 洪水事例		ピーク比流量 (m ³ /s/km ²)	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	T _c	NS係数	Jpe	k ₁₃	SWI
台風10号	2016年8月	6.01	3.000	1.264	1.200	28.0	0.90	0.14	0.20	211
台風7号	2016年8月	3.19	7.000	0.215	1.400	64.0	0.90	0.29	0.40	128
既往2位	2003年8月	5.73	3.850	0.360	1.375	18.9	0.92	0.22	0.38	140
既往3位	2011年9月	5.28	16.700	0.480	1.400	7.3	0.67	0.53	0.40	99
既往4位	2005年9月	4.78	2.505	4.600	1.250	84.0	0.87	0.18	0.25	104
既往5位	2014年8月	4.52	4.700	4.204	1.600	66.0	0.80	0.38	0.60	108
既往6位	2013年9月	4.06	2.975	9.875	1.550	120.0	0.82	0.31	0.55	77
既往7位	2002年8月	3.96	0.759	5.800	3.750	4.0	0.71	0.38	2.75	114
平均			4.005	3.420	1.396	63.5				

は降雨開始*i*時間後の計算流出量(m³/s)、*N*は総降雨時間数である。

また、計算流量の誤差評価指標として、次式の Nash-Sutcliffe 係数⁹⁾ (以下、NS 係数) およびピーク相対誤差 (以下、Jpe) を用いて評価した。

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (q_{oi} - q_{ci})^2}{\sum_{i=1}^N (q_{oi} - q_{oave})^2} \quad (3), \quad Jpe = \frac{|q_{op} - q_{cp}|}{q_{op}} \quad (4)$$

ここで、 q_{oi} は降雨開始 *i* 時間後の観測流出量(m³/s)、 q_{ci} は降雨開始 *i* 時間後の計算流出量(m³/s)、 q_{oave} は観測流出量平均(m³/s)、 q_{op} は観測ピーク流出量(m³/s)、 q_{cp} は計算流出量(m³/s)、*N* は総降雨時間数である。なお、NS 係数は 1.0 に近いほどモデルの精度が高く、0.7 以上で再現性は高いとされる。

3. 結果と考察

3. 1 既往事例における SWI とパラメータ k_{13} の関係

既往洪水事例に関して流出計算を行い、計算流量に対して求めた NS 係数、Jpe、最適化により決定したパラメータと、流量ピーク時の SWI を表-1 に示す。表によると、ピーク比流量が大きい事例となるほど k_{13} が小さくなる関係がわかる。

k_{13} と SWI の対応をプロットしたものを図-6 に示す。指数近似により、金山ダム、札内川ダム流域において以下の関係式を得た。

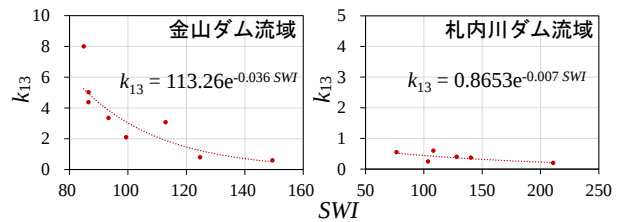
$$\text{金山ダム流域； } k_{13} = 113.26 \exp(-0.036 \text{ SWI}) \quad (5)$$

$$\text{札内川ダム流域； } k_{13} = 0.8653 \exp(-0.007 \text{ SWI}) \quad (6)$$

ここで、 k_{13} ：浸透係数、SWI：土壌雨量指数である。図-6 から、金山ダム流域については SWI が減少するにしたがって k_{13} が顕著に増大する結果となったのに対し、札内川ダム流域では SWI の変動に対する k_{13} の応答が小さいことがわかる。

3. 2 台風 7 号～10 号までの洪水再現結果

前節の結果を用い、2016 年 8 月 1 日 1:00 から 9 月 15 日 0:00 までのレーダー解析雨量を入力値として、金山

図-6 SWI とパラメータ k_{13} の対応関係

ダム、札内川ダム両流域について以下のケースにより流出計算を行い、現行モデルと提案モデルの比較を行った。

ケース 1；表-1 の既往洪水事例のパラメータの平均を使用する。ただし、札内川ダム流域では NS 係数が小さい既往 3 位、7 位事例を棄却した全 6 事例の平均とする。

ケース 2；表-1 より、ピーク比流量が既往 2 位となる事例のパラメータを使用する。

ケース 3；表-1 より、2016 年台風 10 号のパラメータを使用する。

今回の一連の台風事例における各流域の流出再現結果と、台風 10 号のピークにおける Jpe を図-7 に示す。図より、金山ダム流域の事例では最も土壌水分状態が高くなった台風 10 号のピーク流量について、現行モデルよりも安全側に評価する結果となった。また、現行モデルでは複数のピークをもつ洪水事例に対して、最も大きいピーク流量以外を過大評価することがあるが、提案モデルでは各台風のピークの大小関係をよく再現する結果となっている。よって、現行モデルで一定値となっている流出率よりも、土壌の水分状態によって変動するパラメータを用いた提案モデルの方が流出計算の精度向上に寄与すると考えられる。

パラメータ別にみると、金山ダム流域において、提案モデルではケース 3 がピーク流量および各ピークの大小関係を最もよく再現できた一方、ケース 1 およびケース 2 では、先行する台風および台風 10 号の降雨の双方において流量ピークを再現できていないといえず、流量ピークの立ち上がりも遅れる結果となった。

また、提案モデルでは降雨が終了した後も流出が収束せずに高い状態で推移する結果となっている。これについて、ケース 3 を例に、パラメータ k_{13} と SWI の値の推移を図-8 に示す。図によると、SWI が小さい場合、 k_{13} が過大な値をとることが示されている。すなわち、図-5 に示すタンクモデルの第 1 タンクからの浸透流出量が過剰となり、これに伴って第 2 段タンクの流出量が増大することを意味する。このことが流量ピーク後に計算流量が過大評価される原因と推測され、これは k_{13} に関する近似式作成において既往洪水事例を増やし、SWI が小さい状態も勘案することで再現性の向上が可能であると考えられる。

一方、札内川ダム流域の事例では、両モデルで計算した流量に大きな差は見られなかった。図-8 によると、SWI の大小に対して k_{13} の応答が小さいため、現行モデルのパラメータに近い値となり、変動が小さくなったと推測できる。また、パラメータ別に見ると、台風 10 号のパラメータを用いた計算結果が流量の立ち上がりの追随等を良好に再現できた。

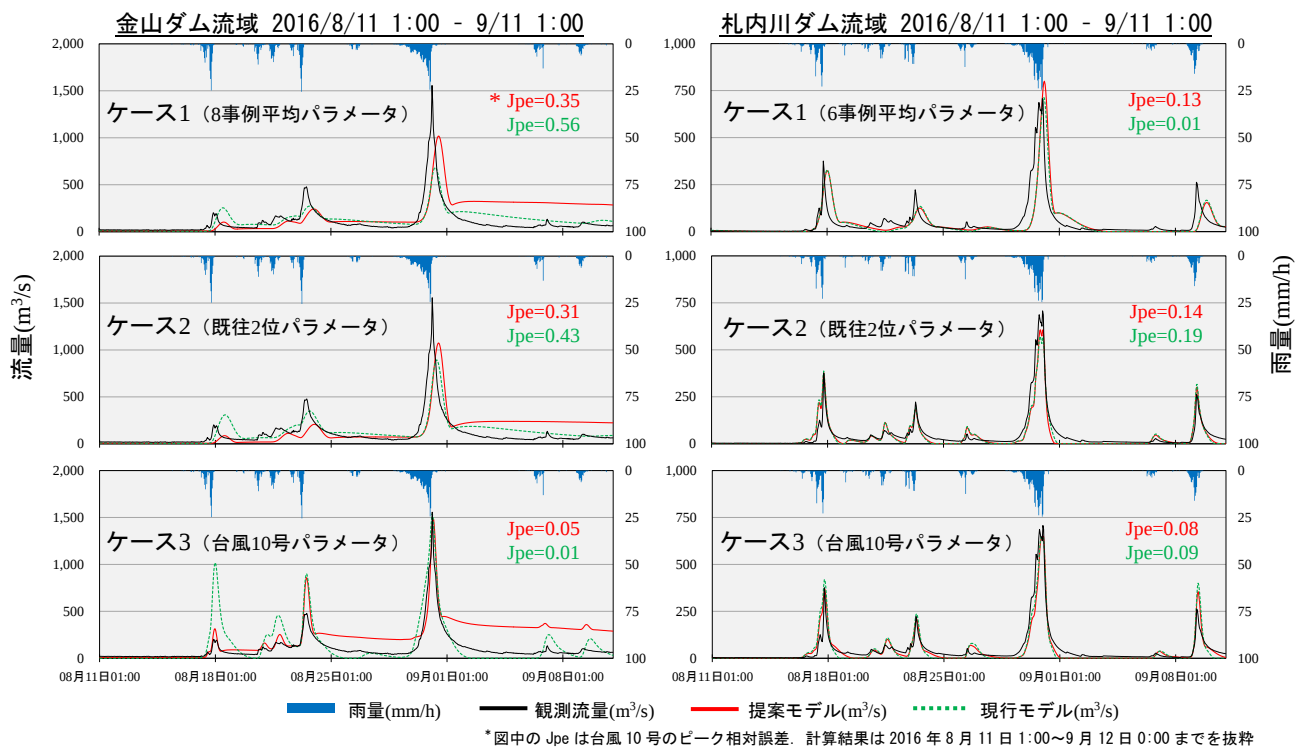


図-7 2016 年台風 7～10 号の降雨による流出の再現結果

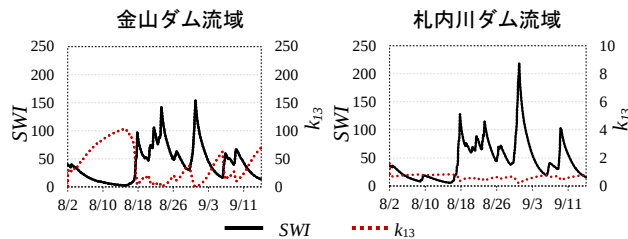


図-8 ケース 3 における SWI と k_{13} の値の推移

4. 結論

本研究において得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 金山ダムおよび札内川ダムの流域において、2016 年 8 月の台風事例および既往洪水事例の流出解析を現行モデルにより行い、事例ごとのモデルパラメータを決定した。
- 2) 土壌水分状態を表す指標として SWI を推定し、浸透に係るパラメータ k_{13} との相関関係を示した。
- 3) 浸透に係るパラメータ k_{13} を変動させる提案モデルを用いた計算を行い、降雨ごとにピーク流量が増大する再現結果が得られた。その結果、連続する降雨による流量のピークに対して、提案モデルはその変動に沿った再現が可能であることが示唆された。

以上、土壌水分状態の変化を考慮した流出モデルの提案を行った。今後はパラメータ設定方法の改善により、流量の再現性の向上や他の流域における流出計算への適用を目指していきたいと考える。

謝辞： 本研究を進めるにあたり、（一財）日本気象協会の臼谷友秀氏ならびに国土交通省北海道開発局には、データ提供等で協力いただいた。ここに記して謝意を表す。

本研究は、土木学会 2016 年 8 月北海道豪雨災害調査団の調査報告の一部である。

参考文献

- 1) 谷口陽子, 中津川誠, 臼谷友秀：長期水循環に基づく流域の湿潤状態を考慮した洪水流出解析の研究, 土木学会論文集 B1 (水工学), 72 巻, 4 号, pp. 163-168, 2016.
- 2) 国土交通省北海道開発局：平成 28 年台風第 10 号による出水の概要, http://www.hkd.mlit.go.jp/topics/pres/pres_h2809/02_gaiyou.pdf (閲覧日：2016/9/3)
- 3) 気象庁：台風第 7 号、第 11 号、第 9 号、第 10 号及び前線による大雨・暴風, http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/data/bosai/report/2016/20160906/jyun_sokuji20160816-31.pdf (閲覧日：2016/9/20)
- 4) 気象庁：土壌雨量指数, <http://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/bosai/dojoshisu.html> (閲覧日 2016/10/26)
- 5) 岡田憲治, 牧原康隆, 新保明彦, 永田和彦, 国次雅司, 斉藤清：土壌雨量指数, 天気, 48 (5), pp.349-356, 2001.
- 6) (財) 北海道河川防災研究センター・研究所：実践流出解析ゼミ 講義テキスト編, 第 4 回, 第 8 回, 第 12 回, 2006.
- 7) 水村和正：水文学の基礎, 東京電機大学出版局, pp.44, 2008
- 8) Nash, J.E. and Sutcliffe, J. V. River flow forecasting through conceptual models part I - A discussion of principles -, J. of Hydrology, Vol.10 ; pp.282-290, 1970.